

Quelle valeur donner à l'action pour le climat ?

What Value Do We Attach to Climate Action?

Alain Quinet*

Résumé – Pour guider les politiques d'atténuation du changement climatique, les économistes s'attachent à donner une valeur monétaire au carbone émis ou évité. Élaborer une trajectoire de long terme de valeurs carbone, c'est en effet prendre la mesure du chemin économique à parcourir pour réduire les émissions, donner de la valeur aux investissements de long terme, et disposer d'une référence pour fixer les priorités. Les objectifs de neutralité carbone inscrits dans l'Accord de Paris de 2015 conduisent aujourd'hui à afficher des valeurs monétaires du carbone supérieures à celles historiquement dérivées d'un objectif de type « Facteur 4 » ou d'une approche coûts-avantages. L'objet de cet article est de rendre compte de l'évolution dans le temps des valeurs carbone en précisant leurs méthodes d'élaboration et la nature des incertitudes qui entourent les évaluations. Il explicite ensuite comment utiliser cette valeur pour concevoir les politiques d'atténuation.

Abstract – *In the course of policy-making to mitigate the effects of climate change, economists seek to attach a monetary value to actual or foregone carbon emissions. Charting a long-term pathway for carbon prices involves measuring the most cost-effective way to reduce emissions, assigning value to long-term investment, and having a benchmark against which to set priorities. The carbon neutrality target, as set out in the 2015 Paris Agreement, calls for higher carbon values in monetary terms than those historically obtained under Factor 4 targets derived from a cost-benefit approach. This paper looks at developments in carbon values over time, with an emphasis on their underlying methodologies and the role of uncertainty in valuation. It then sets out how carbon values can be used in policy-making to mitigate the effects of climate change.*

Codes JEL / JEL Classification : Q51, Q54

Mots-clés : carbone, climat, externalité, incertitude, irréversibilités

Keywords: carbon, climate, externality, uncertainty, irreversibility

Rappel :

Les jugements et opinions exprimés par les auteurs n'engagent qu'eux mêmes, et non les institutions auxquelles ils appartiennent, ni a fortiori l'Insee.

* Président de la commission sur la valeur tutélaire du carbone

Je remercie Dominique Bureau, Christian Gollier, Aude Pommeret et Jean-Michel Trochet pour leurs commentaires sur une version préliminaire de cet article, ainsi que deux relecteurs anonymes.

La qualité du climat, jadis considérée par les pères fondateurs de l'économie comme un bien libre, disponible en quantité illimitée, est progressivement rentrée dans la catégorie des biens économiques, c'est-à-dire des biens utiles mais rares. Dès 1972, William Nordhaus et James Tobin, dans un article intitulé « *Is Growth Obsolete?* », critiquent le rapport Meadows « *The Limits to Growth* », publié la même année sous l'égide du club de Rome, et prédisant un épuisement des ressources naturelles. Ils expliquent que les raretés à venir ne porteront pas sur les matières premières ou énergétiques – car celles-ci seront protégées d'une exploitation trop rapide par la hausse de leur prix – mais des biens communs, disponibles gratuitement et faisant donc l'objet d'une exploitation excessive. Et de conclure sur la nécessité de se focaliser sur la préservation des ressources naturelles « gratuites » (« l'air pur ») plutôt que sur la préservation des ressources naturelles « payantes » : « *Il n'y a pas de raison de stopper la croissance économique pour préserver les ressources naturelles, mais il y a de bonnes raisons à fournir les incitations économiques appropriées pour préserver les ressources dont les coûts d'exploitation privés sont inférieurs au vrai coût pour la société.* »¹

Dans le sillage de Tobin & Nordhaus, une petite communauté d'économistes a construit l'économie du climat, pour définir les conditions de préservation de ce bien collectif désormais fragile que constitue l'équilibre climatique de la planète. L'économie du climat repose sur le traitement des quatre dimensions fondamentales du changement climatique :

- l'externalité : les marchés livrés à eux-mêmes ne délivrent pas les bons signaux de prix puisque les agents économiques peuvent émettre gratuitement des gaz à effet de serre (GES) et négliger les impacts de leurs émissions sur les générations présentes – la « tragédie des communs » – et les générations futures – la « tragédie des horizons ». Si les externalités sont, depuis les travaux de Pigou (1920), bien connues des économistes et des décideurs, les émissions de GES dépassent par leur ampleur et leur impact toutes les autres externalités connues ;

- la dimension mondiale de l'externalité : une tonne de CO_{2e} émise² a un impact identique sur le climat quelle que soit son origine géographique. C'est une externalité qu'historiquement les pays riches ont imposé aux pays pauvres, mais avec cette difficulté qu'aujourd'hui les opportunités d'abattement à faibles coûts sont pour une large part localisées dans les pays émergents, au titre

notamment de leur production de charbon. Dessiner des incitations à la fois efficaces et équitables pour dépasser les phénomènes de « passager clandestin » constitue l'un des principaux enjeux de l'économie du climat (Tirole, 2009 ; d'Autume *et al.*, 2016) ;

- l'inertie de l'externalité climatique : le réchauffement climatique est provoqué par l'accumulation d'un stock de GES dans l'atmosphère. Celui-ci augmente avec les émissions de GES et décroît avec l'absorption naturelle (des eaux, des forêts et autres puits de carbone). La concentration du seul CO₂ était de 280 ppm environ avant le début de la révolution industrielle ; elle dépasse aujourd'hui 400 ppm. Le réchauffement a d'ores et déjà atteint 1 degré. Mais compte tenu des stocks déjà accumulés, nous avons devant nous une perspective de réchauffement supplémentaire de 1 à 3 degrés d'ici la fin du siècle (GIEC 2014). Les échelles de temps très longues donnent une importance toute particulière au choix du taux d'actualisation dans l'évaluation des dommages (Stern, 2006 ; Dasgupta 2008) ;

- les incertitudes : la lutte contre le changement climatique se heurte à des incertitudes « en cascade » : incertitudes scientifiques sur l'ampleur de la hausse des températures induite par l'augmentation de la concentration de GES dans l'atmosphère (*climate sensitivity*) ; incertitudes sur les impacts du changement climatique, notamment sur les seuils (*tipping points*) au-delà desquels certains changements systémiques risquent de se manifester ; incertitudes sur les technologies susceptibles d'être mobilisées pour atténuer les émissions et leurs impacts. Ces incertitudes signifient que la lutte contre le changement climatique relève d'une logique de précaution (Pyndick, 2006 ; Weitzman, 2007). De plus, la prise en compte du risque de dommages graves et irréversibles conduit à donner une valeur d'option aux solutions les plus flexibles – celles qui permettent de moduler les politiques publiques en fonction de l'arrivée de nouvelles informations (Arrow & Fischer, 1974 ; Henry, 1974).

Ces quatre traits caractéristiques du changement climatique permettent d'emblée de saisir l'ampleur des défis auxquels font face

1. « There is no reason to arrest economic growth to conserve natural resources, although there is good reason to provide proper economic incentives to conserve resources which currently cost their users less than true social cost ».

2. Les tonnes de gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane, protoxyde d'azote, etc.) sont exprimées ici en tonne équivalent CO₂ de pouvoir de réchauffement.

les économistes. Ceux-ci sont parvenus en un temps record à adapter la « boîte à outils » traditionnelle de l'économie – le traitement des externalités (Pigou, 1920), la gestion des ressources épuisables (Hotelling, 1931), la prise en compte du bien-être à long terme (Ramsey, 1928), l'évaluation socio-économique des projets d'investissement (Dupuit, 1844), à un problème nouveau et de grande ampleur. L'économie s'est ouverte aux sciences du climat et aux autres sciences physiques, aux sciences humaines et de la décision, pour modéliser les conséquences du réchauffement climatique sur les activités humaines, ainsi que les coûts économiques de la lutte contre ce phénomène. Elle propose désormais un corpus méthodologique complet dont rendent compte plusieurs *surveys* de la littérature académique, notamment ceux de Pindyck (2013), et Heal (2017).

Il y a naturellement des controverses au sein de la profession, qui résultent à la fois des incertitudes scientifiques qui rendent les modélisations toujours fragiles (Stern, 2013 ; Pindyck, 2017) et de la nécessité de mobiliser les outils traditionnels du calcul économique au-delà de leur champ d'application habituels – c'est le cas notamment du taux d'actualisation, utilisé pour donner une valeur présente à des dommages ou des actions susceptibles de s'étaler sur plusieurs décennies voire plusieurs siècles (Gollier & Weitzman, 2010).

De telles controverses sont la condition du progrès dans un traitement économique plus pertinent des enjeux climatiques. Elles ne doivent pas masquer un point de consensus essentiel : il n'y a pas de transition écologique possible, pas de politique d'atténuation du changement climatique crédible si la pollution reste gratuite et si chacun ignore les dommages qu'il impose aux autres. En d'autres termes, compte tenu de la multitude d'activités humaines et d'acteurs concernés, une tarification minimale du carbone est une condition nécessaire, quoique non suffisante, d'une lutte efficace contre le changement climatique (Stern & Stiglitz, 2017).

Cet article vise à rendre compte des développements empiriques autour de la valeur monétaire à donner à chaque tonne de CO_{2e} émise ou évitée. Cette valorisation constitue en effet une référence incontournable si l'on veut tout à la fois évaluer en termes économiques le chemin à parcourir, définir le champ des actions pertinentes et bien calibrer les politiques publiques d'atténuation.

La valeur du carbone n'étant pas donnée sur un marché, elle est le produit de travaux de modélisation réalisés soit à l'initiative d'équipes universitaires, soit à l'initiative des pouvoirs publics – dans ce dernier cas la valeur du carbone est qualifiée de « tutélaire ». Cet article présente les plages de valeurs du carbone cohérentes avec le respect des objectifs de l'Accord de Paris de 2015, tant au niveau international qu'au niveau français dans le cadre de la deuxième commission sur la valeur tutélaire du carbone de 2019 (Quinet, 2019). Ces valeurs s'avèrent supérieures au seuil des 100 \$ la tonne de CO_{2e}, ce qui soulève des questions nouvelles : comment les réconcilier avec celles plus faibles et incertaines issues d'une approche coûts-avantages ? Comment les traduire en actions publiques ?

La lutte contre le changement climatique à l'épreuve de l'épuisement des budgets carbone

La valorisation du carbone peut relever de deux types d'approches : l'approche dite « coûts-avantages » et l'approche dite « coût-efficacité ».

L'approche coûts-avantages consiste à réaliser un bilan global actualisé des dommages induits à court, moyen et long terme par l'émission d'une tonne de CO_{2e}. La comparaison entre le coût marginal des dommages et le coût marginal d'abattement³ détermine la trajectoire socialement optimale de réduction des émissions. La valeur du carbone, qualifiée dans cette approche de « coût social du carbone » (*social cost of carbon*), reflète en termes monétaires le coût social des dommages et, corrélativement, le gain de bien-être tiré d'une réduction des émissions. Se conformer à une telle approche permet en principe de s'assurer contre deux risques : celui de faire des efforts démesurés pour un bénéfice social faible ; celui de ne pas faire suffisamment d'efforts alors que le coût à supporter est faible pour un bénéfice important.

Dans l'approche dite « coût-efficacité », on se donne un objectif exogène d'abattement, et l'on cherche le niveau et la trajectoire de valeurs du carbone qui permet de l'atteindre de la manière la plus efficace possible. La valeur du carbone

3. Le coût d'abattement se définit comme l'écart de coût actualisé entre l'action de décarbonation et la solution de référence carbonée équivalente, rapporté aux émissions de gaz à effet de serre évitées par l'action. L'écart de coût est actualisé car le coût d'abattement intègre les coûts liés à l'investissement initial, mais aussi les coûts liés à l'usage de cet investissement.

est ici la variable duale de la contrainte quantitative – c’est pourquoi l’on qualifie cette valeur de « prix fictif du carbone » (*shadow price of carbon*). Cette approche peut sembler de second rang par rapport à l’approche coût-avantages, mais elle permet de faire l’économie des débats sur le coût et l’actualisation des dommages et s’appuie sur un corpus méthodologique solide – celui de la gestion optimale des ressources épuisables.

La gestion du budget carbone

Comme l’externalité climatique est liée au niveau de concentration de GES dans l’atmosphère, les objectifs à respecter s’expriment en budget carbone, c’est-à-dire en plafond d’émissions nettes cumulées dans le temps de CO₂ à ne pas dépasser pour contenir l’élévation des températures.

Dans cette approche, le niveau de la valeur carbone dépend de la taille du budget carbone, des technologies de décarbonation disponibles, des changements de comportement accessibles pour atteindre cette ambition, ainsi que des possibilités de recourir à des mécanismes de flexibilité internationale (achats de permis d’émissions sur un marché international, possibilité de recourir à des puits de carbone hors du territoire national, etc.).

La pente de la trajectoire de valeur carbone relève d’une logique d’optimisation d’une ressource naturelle épuisable. Le prix d’une telle ressource va logiquement croître au fur et à mesure de sa consommation du fait de sa rareté croissante. Plus précisément, la valeur de la tonne de CO_{2e} a vocation à progresser comme le taux d’actualisation (Schubert, 2008 ; Chakravorty *et al.*, 2008). Cette règle d’optimisation, dite de Hotelling (1931), garantit que l’actualisation des valeurs carbone futures n’est pas écrasée par l’actualisation (voir encadré). Corrélativement elle protège contre le risque de créer une incitation au report des efforts, comme ce serait le cas si la valeur croissait plus vite que le taux d’actualisation – ce que l’on appelle le « paradoxe vert » (Sinn, 2015).

La mise en œuvre de la règle de Hotelling soulève plusieurs questions opérationnelles. Les travaux en France de la dernière commission sur la valeur tutélaire du carbone (Quinet, 2019) ont été notamment l’occasion d’explicitier la double question du choix du taux d’actualisation et des dynamiques d’investissement sous-jacentes à

la gestion du budget carbone (Gollier, 2019 ; Le Hir *et al.*, 2019).

Gollier (2019) montre que le taux d’actualisation doit inclure, au-delà du taux sans risque, un « beta climatique », i.e. une prime de risque prenant en compte l’impact de la politique climatique sur la macroéconomie, et plus précisément l’incidence de la covariance entre les coûts d’abattement marginaux et la consommation agrégée.

Une incertitude sur le budget carbone plaide pour une valeur initiale relevée et un rythme de croissance de la valeur inférieur au taux d’actualisation, pour être en mesure d’absorber sans heurts une révision du budget carbone à mi-parcours. Le raisonnement repose sur la corrélation négative entre les coûts d’abattement marginaux et la consommation. Si le budget carbone est révisé à la baisse, cela accroît les coûts d’abattement marginaux (supposés croissants) et laisse moins de possibilités de consommation. Si au contraire le budget carbone s’avère plus important qu’initialement envisagé, le coût marginal d’abattement sera plus faible et la consommation plus élevée. Cette corrélation négative entre coût d’abattement et consommation conduit à un « beta » négatif.

Ce raisonnement s’applique aussi lorsque l’incertitude porte sur les technologies de décarbonation : en cas de bonne surprise, les coûts marginaux d’abattement futurs seront plus bas et la consommation plus forte.

À l’inverse lorsque la macroéconomie constitue la principale source d’incertitude, la corrélation entre coûts marginaux d’abattement et consommation est positive. Si la croissance s’avère plus forte que prévu, les émissions seront plus élevées et les coûts marginaux d’abattement aussi en conséquence, ce qui implique un « beta » positif. Dans cette configuration le bénéfice d’un investissement d’abattement est croissant dans le temps, et plus élevé que le taux d’actualisation – ce qui correspond à la rémunération de cet investissement sous forme de prime de risque. La valeur initiale du carbone est en conséquence plus faible et son taux de croissance supérieur au taux d’actualisation.

Le modèle de Le Hir *et al.* (2019), pour sa part, affine la règle de Hotelling en raisonnant simultanément sur deux stocks : le budget carbone – qui s’épuise au fil du temps – et le capital productif des entreprises – qui doit progressivement se « verdier ». À chaque stock est associé

ENCADRÉ – Modélisation théorique simple de la gestion d'un « budget carbone »^(a)

On considère :

- que les agents économiques retirent une utilité $U(R_t)$ de la consommation à l'instant t des énergies fossiles ;
- qu'on dispose d'un taux d'actualisation ρ qui permet de pondérer ces différentes utilités en fonction du temps.

On cherche alors à résoudre le programme de maximisation d'une expression qui somme toutes les utilités générées dans le temps par la consommation de cette ressource fossile.

$$\text{Max} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} U(R_t) dt$$

Cette maximisation est établie sous trois contraintes :

$$\dot{S}_t = R_t$$

$$\dot{M} = \varepsilon R_t - \alpha M_t$$

$$M_t \leq Z$$

S_0, M_0 étant donnés

La première contrainte considère que l'extraction et la consommation de la ressource R diminue un stock fini S (ressources mondiales existantes), dont on connaît le niveau à l'instant t .

La seconde contrainte considère que la concentration de CO_2 , M , augmente avec les émissions qui sont-elles proportionnelles à l'extraction de R (d'un coefficient constant ε) et diminue avec l'absorption naturelle du CO_2 (qui est égale à une fraction α de la concentration de l'atmosphère en CO_2).

La troisième considère que la concentration de l'atmosphère ne doit pas dépasser un niveau considéré comme dangereux noté Z .

L'outil mathématique associé à chacune de ces contraintes des coefficients qui permettent la résolution du problème et dont le sens économique est le suivant :

- $\lambda_t > 0$, désignant le prix implicite de la ressource (rente de rareté) ;

- $\mu_t > 0$, désignant le prix implicite du stock de carbone (valeur carbone) ;

- $\omega_t > 0$, multiplicateur associé à la contrainte de concentration. Il est nul si la contrainte n'est pas atteinte, positif dans le cas contraire.

À l'optimum les relations suivantes sont réalisées :

$$U'(R_t) = \lambda_t + \varepsilon \mu_t, \quad \frac{\dot{\mu}_t}{\mu_t} = \rho + \alpha - \frac{\omega_t}{\mu_t}, \quad \frac{\dot{\lambda}_t}{\lambda_t} = \rho$$

La rente de rareté croît sur ce chemin optimal au taux d'actualisation r :

$$\lambda_t = \lambda_0 e^{\rho t}$$

La valeur carbone croît sur ce chemin optimal au taux d'actualisation augmenté du taux d'absorption naturelle de carbone dans l'atmosphère :

$$\mu_t = \mu_0 e^{(\rho + \alpha)t}$$

(a) Rapport sur la valeur tutélaire du carbone (Quinet, 2008).

une valeur – la valeur du carbone et la valeur du capital d'abattement. Une révision en baisse non anticipée du budget carbone se traduirait par des besoins d'adaptation immédiats et coûteux du stock de capital. Ce risque incite à anticiper les investissements d'abattement et de « verdissement » de l'économie, donc à accroître le niveau initial de la valeur du capital d'abattement.

Le cadre bien défini de l'analyse coûts-efficacité doit aujourd'hui affronter un nouveau défi, celui de la perspective d'un épuisement rapide des budgets carbone, comme l'illustre la figure I ci-dessous qui présente, pour trois objectifs de réchauffement maximum et différents niveaux de probabilités, le dimensionnement des budgets carbone. Le cinquième rapport du GIEC publié en 2013 et 2014 a montré qu'en l'absence d'effort spécifique sur la réduction des émissions, le budget carbone mondial pour limiter à 2°C la hausse des températures serait

épuisé avant le milieu du siècle (GIEC, 2014). Toujours selon le GIEC, si l'on reste prudent sur le volume potentiel d'émissions négatives, il convient de viser un objectif durable de neutralité carbone, c'est-à-dire un équilibre entre les émissions brutes de GES et les puits de carbone que sont notamment les forêts, les prairies permanentes et éventuellement, à plus long terme, des dispositifs technologiques de séquestration géologique du carbone. C'est le sens de l'Accord de Paris signé en 2015.

Cet épuisement du budget carbone à l'horizon du milieu du siècle laisse peu de temps pour s'ajuster, ce qui entraîne des conséquences importantes pour dessiner le chemin économique de la transition :

- il faut mobiliser rapidement des technologies de décarbonation donc le coût et le potentiel d'abattement restent très incertains à ce stade. Dans certains secteurs spécifiques (acier,

chimie, fret longue distance, etc.) les solutions techniques permettant une décarbonation totale n'existent pas, d'où le rôle très important des puits de carbone pour arriver à « zéro émissions nettes » ;

- il faut minimiser autant que possible le quantum d'actifs échoués, c'est-à-dire d'actifs émetteurs de GES non amortis qui devront être déclassés pour atteindre la neutralité carbone, en particulier les centrales à charbon. Cela signifie que l'effort doit être suffisamment progressif pour éviter le déclassement précoce d'actifs existants et suffisamment ferme pour dissuader dès à présent la construction de nouveaux actifs polluants ;

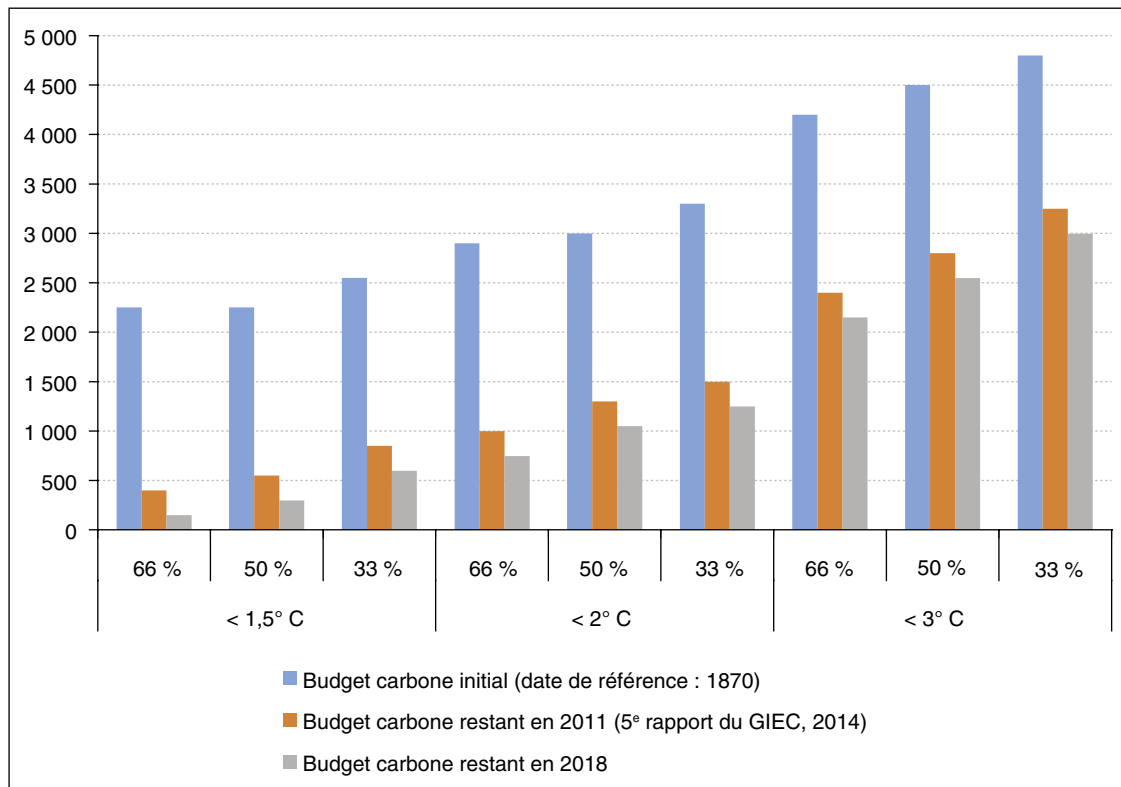
- il faut pour parvenir au « zéro émissions nettes », engager des investissements à durée de vie longue, voire très longue (par exemple une ligne de chemin de fer ou une ligne de transport d'électricité). La valeur économique résiduelle de nouveaux équipements utiles pour atteindre un objectif « zéro émissions nettes » en 2050 mais non encore amortis à cet horizon doit être prise en compte dans le calcul économique de ces équipements.

Des valeurs carbone sensiblement revues en hausse

Les valeurs carbone associées aux objectifs de décarbonation font l'objet d'une forte revalorisation à la hausse à mesure que le budget carbone se consomme et que les objectifs se durcissent. Le tableau 1 ci-dessous donne les moyennes de valeurs carbone pour le monde issues des simulations recensées par le GIEC, sachant que la dispersion est forte autour de ces moyennes. On constate logiquement que les valeurs sont d'autant plus élevées que le scénario de décarbonation est exigeant. Dans les scénarios « 1.5°C », les valeurs dépassent à l'horizon 2030 100 \$ puis « s'envolent » au-delà de 2030.

De fait, ce tableau met en évidence les difficultés qui s'attachent à la modélisation de la transition vers une économie neutre en carbone. Les modèles donnent une perspective pertinente de la valeur carbone requise jusqu'à l'horizon 2030, voire 2040, ou de manière alternative jusqu'à une réduction d'émissions proche du « Facteur 4 » (division par 4 des émissions de gaz à effet de

Figure 1
Les budgets carbone disponibles selon les objectifs de limitation des températures (en milliards de tonnes de CO₂)



Note : les pourcentages indiquent des probabilités de respect des objectifs de hausse des températures.
Source : Quinet (2019).

serre par rapport à 1990). La robustesse des résultats s'émousse ensuite au fur et à mesure que l'on s'éloigne dans le temps, que le niveau d'émissions se réduit et que l'on s'approche du seuil où les réductions deviennent de plus en plus difficiles et appellent des changements fondamentaux, non marginaux, que les modèles calibrés sur les coûts des technologies existantes ou prévisibles ne savent plus prédire. Enfin on remarquera que la pente des trajectoires de 2030 à 2050 est sensiblement supérieure à ce que donnerait une règle de Hotelling, suggérant une tendance à sous-estimer le besoin d'effort initial.

Une nouvelle trajectoire française des valeurs du carbone cohérente avec le respect des objectifs de l'Accord de Paris

Pour contribuer à l'effort collectif inscrit dans l'Accord de Paris, la France, dans le Plan Climat de juillet 2017, s'est fixée l'objectif d'atténuation « zéro émissions » nettes de GES à l'horizon 2050, les émissions brutes résiduelles ayant vocation à être absorbées par les puits de carbone et éventuellement des dispositifs technologiques de séquestration du carbone. Cet objectif est plus ambitieux que le précédent objectif dit « Facteur 4 » (division par quatre des émissions par rapport à 1990).

L'approche coûts-efficacité permet de déterminer une valeur carbone française cohérente avec cet objectif. Dans le sillage des travaux fondateurs de Marcel Boiteux sur les valeurs tutélaires, c'est-à-dire des valeurs monétaires que l'État donne aux gains ou pertes de bien-être (Boiteux, 2001), un premier travail spécifique avait été réalisé en 2008 pour valoriser les actions

permettant d'éviter l'émission d'une tonne de CO_{2e} au regard d'un objectif « Facteur 4 ». La valeur de référence avait été fixée à 100 €₂₀₀₈ la tonne de CO_{2e} en 2030, progressant ensuite selon une règle de Hotelling à 250 €₂₀₀₈ en 2050 (Quinet, 2008). Dix ans plus tard, un second rapport (Quinet, 2019) est venu mettre à jour ce référentiel pour tirer les leçons du retard pris au niveau mondial dans la réduction des émissions de GES, des objectifs de l'Accord de Paris de 2015, ainsi que des nouvelles opportunités technologiques.

Une trajectoire carbone fondée sur le meilleur état de l'art

Force est de constater qu'il n'existe pas d'outil de simulation « clés en mains » générant mécaniquement une trajectoire de valeur du carbone. Le nouveau rapport propose une trajectoire raisonnée de la valeur carbone définie collectivement par les meilleurs experts français de l'économie du climat, et fondée sur le meilleur état de l'art. Cette trajectoire intègre au-delà des principes généraux de l'économie du climat, deux ingrédients spécifiques :

- premier ingrédient : les simulations de 5 modèles différents (Times, Poles, IMACLIM, ThreeME et NEMESIS). L'approche coût-efficacité adoptée ici ne nécessite pas de modéliser la courbe de dommages puisque l'objectif de réduction des émissions est considéré comme déjà fixé par l'Accord de Paris. Seules les dynamiques technologiques et macroéconomiques du système, ainsi que les flux d'émissions de GES, doivent être modélisés. Ces modèles permettent de définir une trajectoire représentant le coût de la réduction d'une tonne additionnelle de CO_{2e}, ce coût marginal d'abattement ayant tendance à croître dans le temps au fur et à mesure qu'il

Tableau 1
Valeurs carbone recensées par le GIEC (en \$ 2010 par tonne de CO₂)

Scénario	Contenu	Valeurs carbone en 2030	Valeurs carbone en 2050
1.5°C	Probabilité de dépasser 1.5°C inférieure à 34 %	1 472	3 978
1.5°C low	Probabilité de dépasser 1.5°C comprise entre 34 % et 50 %	334	1 026
1.5°C high	Probabilité de dépasser 1.5°C comprise entre 50 % et 67 %	129	586
Lower 2°C	Probabilité de dépasser 2°C inférieure à 34 %	164	518
Higher 2°C	Probabilité de dépasser 2°C comprise entre 34 % et 50 %	56	169
Above 2°C	Probabilité de dépasser 2°C supérieure à 50 %	21	63

Note : dans chaque scénario, moyenne de prix sur divers modèles et simulations.
Source : GIEC (2018).

est nécessaire de mobiliser des technologies plus onéreuses. Ces modèles permettent d'explicitier les investissements et les changements de comportement nécessaires à l'atteinte de la neutralité carbone ;

- deuxième ingrédient : des exercices de prospective technologique ou technico-économique. Ceux-ci, tels ceux conduits par l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2017), permettent d'évaluer le potentiel de décarbonation de différentes technologies, leur vitesse de déploiement et leurs coûts. Sur la base de ces travaux, le rapport n'a pas la prescience de l'arrivée d'une nouvelle technologie « *backstop* » – c'est-à-dire d'une technologie de substitution permettant à elle seule de se passer complètement des énergies fossiles pour un coût stabilisé. Il postule l'émergence d'un potentiel restreint d'émissions négatives, c'est-à-dire une taille limitée des puits de carbone n'autorisant pas un relâchement des efforts. Pour atteindre un objectif de décarbonation complète, il considère qu'un portefeuille de technologies structurantes (recours par exemple à un usage direct plus étendu de l'électricité décarbonée ou à un usage indirect via le vecteur hydrogène, développement des possibilités de capture et de séquestration du CO₂) permettrait de parvenir à une décarbonation complète moyennant des prix de bascule relativement élevés.

Une valeur cible relevée de 100 à 250 € en 2030

Le rapport considère que l'horizon 2030 a vocation à constituer le point d'ancrage privilégié d'une trajectoire de valeur carbone, pour deux raisons fondamentales : un horizon de 10 ans est décisif pour « ancrer » les anticipations et déclencher une vague d'investissements « bas carbone » ; à cet horizon les travaux de modélisation peuvent s'adosser à des éléments de prospective économique et technologique raisonnablement solides, même s'ils restent naturellement entourés d'incertitudes.

Sur la base des travaux de modélisation réalisés, le rapport propose, en partant de la valeur de 54 € en 2018, de retenir une valeur du carbone de 250 €₂₀₁₈ en 2030, ce qui implique donc une phase de rattrapage. Au-delà de 2030, la croissance de la valeur carbone se réduit sensiblement pour se caler à compter de 2040 sur une règle de Hotelling pour un taux d'actualisation public de 4.5 %. La valeur 2050 s'établit à 750 €.

Une valeur en ligne avec les estimations recensées par le GIEC

La valeur proposée en 2030 est significativement plus élevée que celle du référentiel actuel issu du rapport de 2008 (100 €₂₀₀₈, soit 110 € en valeur d'aujourd'hui). Cela reflète principalement le retard pris et le relèvement corrélatif du niveau d'ambition au-delà du « Facteur 4 », qui impliquent des coûts d'abattement élevés ou des ruptures technologiques dans plusieurs secteurs de l'économie, en particulier dans l'agriculture (nécessité d'adapter le type de culture ou d'élevage), dans certains secteurs industriels (besoin de trouver des substituts ou des technologies en rupture dans des productions essentielles telles que le ciment, la chimie ou l'acier), et dans les transports longue distance (par terre, air ou mer). Le relèvement de la valeur carbone reflète aussi le caractère encore insuffisant du niveau de coopération internationale et l'absence de mécanismes de flexibilité internationale.

La valeur du carbone française est dans la fourchette des valeurs mondiales du carbone recensées dans le dernier rapport spécial du GIEC d'octobre 2018 pour des cibles de moins de 2 degrés (cf. tableau 1), fourchette elle-même sensiblement revue en hausse on l'a vu pour tenir compte des risques d'épuisement rapide des budgets carbone mondiaux.

Un résultat sensible au niveau de coopération internationale et au coût des innovations

La définition d'une trajectoire de valeur du carbone doit expliciter les incertitudes qui entourent les évaluations, incertitudes qui vont croissantes au fur et à mesure que l'horizon s'allonge et que le champ des possibles technologiques et diplomatiques s'élargit. Au-delà de 2030, les valeurs proposées pourraient être revues à la baisse en cas de changements de comportement des acteurs qui auraient pleinement intégré les exigences de la lutte contre le changement climatique ou en cas d'accès à un portefeuille de technologies de décarbonation plus large.

La sensibilité des résultats au coût des technologies est étroitement liée aux hypothèses de coopération internationale sous-jacentes. Au niveau industriel, des efforts de recherche et d'innovation davantage tournés vers des solutions de décarbonation simultanément engagés dans plusieurs pays auraient des effets

puissants sur le coût des technologies, comme on l'observe actuellement pour les énergies renouvelables. Lorsque plusieurs institutions de recherche et entreprises de différents pays se lancent dans des programmes d'innovation, il en résulte à terme des gains pour chaque pays pris individuellement : chacun bénéficie en effet de l'apparition et de la diffusion mondiale des innovations, ainsi que de la baisse des coûts des technologies permise par les effets d'apprentissage et les économies d'échelle. Ce sont les effets de déversement internationaux (ou *spillover*).

Au total, un scénario de rupture technologique permis par une coopération internationale plus intense aurait sans doute peu d'incidence sur la valeur du carbone 2030 mais permettrait d'envisager une révision en forte baisse de la valeur du carbone au-delà (de 750 € à 450 €, cf. aire grise de la figure II ci-dessous). À l'inverse, un déficit de coopération internationale ne justifierait pas que la France révise à la hausse une valeur de référence du carbone déjà élevée (cf. aire orange de la figure II ci-dessous) : une telle révision ne permettrait pas de mobiliser dans des délais aussi contraints des technologies supplémentaires et risquerait simplement de se traduire par des compressions d'activité et d'emploi, sans gain durable dans la baisse de l'intensité carbone des activités humaines.

Les enjeux liés à une revalorisation des valeurs du carbone

Les approches coûts-efficacité utilisées, tant au niveau mondial qu'au niveau national, conduisent à afficher aujourd'hui des valeurs carbone beaucoup plus élevées que par le passé. Ces hausses reflètent l'épuisement des budgets carbone. Elles soulèvent deux questions fondamentales : comment articuler ces résultats avec ceux plus faibles issus des approches coûts-avantages ? Comment les inscrire dans les politiques publiques visant au respect des objectifs affichés ?

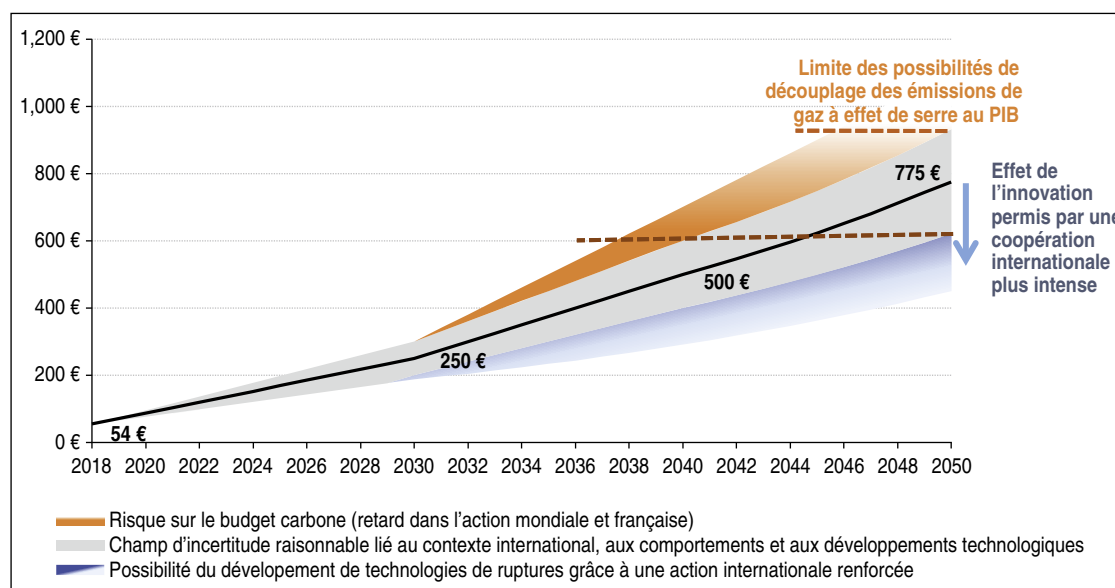
L'articulation entre les résultats des approches coûts-avantages et coûts-efficacité

Pour bien comprendre l'origine des écarts récemment apparus entre les valeurs carbone issues des approches coûts-efficacité et celles issues d'une approche coûts-avantages, il est utile de préciser les trois grands ingrédients nécessaires au calcul du coût marginal des dommages.

La valorisation monétaire des dommages

La modélisation de l'externalité climatique repose crucialement sur deux paramètres : la sensibilité climatique (*climate sensitivity*), i.e.

Figure II
La trajectoire de valeur carbone française



Source : Quinet, 2019.

l'augmentation des températures provoquée par l'accroissement de la concentration de GES dans l'atmosphère ; la fonction de dommages climatiques, qui traduit l'impact du réchauffement sur le bien-être. Le coût des dommages ou coût de l'inaction est exprimé en termes monétaires mais se compose à la fois de coûts marchands – érosion de la productivité et du PIB, baisse des rendements agricoles, destruction de capital productif sous l'effet des catastrophes – et de coûts non marchands – pertes de biodiversité, destruction d'écosystèmes, etc. – auxquels on donne une traduction monétaire. L'évaluation des dommages est ainsi soumise à de grandes incertitudes : comment agréger des impacts très hétérogènes et monétiser des dommages pour partie non marchands ? La fonction de dommages est-elle multiplicative (i.e. les dommages sont-ils corrélés au niveau du PIB) ou additive (i.e. les dommages sont-ils indépendants du niveau du PIB) ? Quelle est la convexité de la courbe de dommages ?

L'actualisation de dommages étalés dans le temps

Le coût marginal des dommages provoqués dans le futur par l'émission d'une tonne de CO_{2e} aujourd'hui doit être actualisé pour être ramené à sa valeur présente. Ce taux d'actualisation engage, s'agissant d'un horizon de long terme, de très loin supérieur à celui des marchés financiers, des choix éthiques – la préférence pure pour le présent, l'aversion aux inégalités intra et intergénérationnelles – une appréciation des perspectives de croissance et des incertitudes qui les entourent (Stern, 2006 ; Gollier, 2012 ; Dasgupta, 2008). Cela est d'autant plus important dans le contexte du réchauffement climatique que des changements de grande ampleur risquent de se matérialiser vers la fin du siècle.

La prise en compte, au-delà des dommages marginaux, du risque de dommages graves et irréversibles

Cette prise en compte du risque catastrophique conduit, sous différentes formes, à augmenter au titre d'une valeur d'option la valeur moyenne des dommages (Henry, 1974, Weitzman, 2014).

L'analyse coûts-avantages appliquée à la lutte contre le changement climatique : « mission impossible » ?

Les analyses coûts-avantages, qui sont *a priori* la base de tout raisonnement économique digne de ce nom, ont été finalement peu nombreuses. La publication du rapport Stern en 2006 a suscité de nombreux débats sur les grands paramètres du calcul coûts-avantages (Weitzman, 2007 ; Nordhaus, 2007 ; Sterner & Petersson, 2008) Mais les modèles d'évaluation intégrée faisant foi au niveau international se comptent « sur les doigts d'une main » : DICE (Nordhaus, 2018), FUND (Anthoff & Tol, 2014) et PAGE (Hope, 2006) en constituent les trois principaux.

Ces modèles doivent affronter des difficultés méthodologiques importantes. Les fourchettes d'évaluation du coût social du carbone auxquelles elles parviennent sont relativement larges, comprises entre 30 et 150 \$ la tonne de CO_{2e} en 2020. On présente ici (tableau 2), sans prétendre à l'exhaustivité, les évaluations de coût social du carbone issues de deux études phares récentes, avec une illustration de leur sensibilité au choix du taux d'actualisation :

- celles du modèle DICE, issu des travaux réactualisés de Nordhaus (2018). Ce modèle a le mérite d'être parfaitement transparent dans ses hypothèses et ses résultats ;

Tableau 2
Coût social du carbone (par tonne de CO₂)

	2015	2020	2050
<i>DICE (valeurs en \$ 2010)</i>			
Taux d'actualisation de 4.25 %	30	35	98
Taux d'actualisation de 2.5 %	111	133	242
<i>US IWG (valeurs en \$ 2007)</i>			
Taux d'actualisation de 3 %	36	42	69
Taux d'actualisation de 2.5 %	105	123	212

Source : Nordhaus (2018), Agences américaines (2016).

- celles réalisées par le groupe de travail conjoint des agences des États-Unis en charge de l'environnement, fondées sur l'utilisation des trois grands modèles DICE, FUND et PAGE (USIWG, 2016).

Comment interpréter les écarts entre les approches coûts-avantages et les approches coûts-efficacité ? Signifient-ils que les modélisations coûts-avantages minimisent le coût des dommages ou à l'inverse que les objectifs de politique climatique sous-estiment les coûts de l'atténuation ?

Historiquement, les économistes ont cherché à réconcilier les ordres de grandeur issus des deux approches en retenant pour les analyses coûts-avantages un taux d'actualisation bas – c'est l'approche issue du rapport Stern qui retient une préférence pour le présent très faible conduisant mécaniquement à des valeurs du carbone plus élevées – et proches des évaluations calées sur des objectifs de type « Facteur 4 ». Sans doute convient-il de souligner que les évaluations de valeur carbone issues des approches coûts-avantages sont plus sensibles au niveau du taux d'actualisation que celles issues des approches coûts-efficacité dans la mesure où elles portent sur des horizons beaucoup plus longs. Les approches coûts-avantages conduisent en effet à actualiser des dommages étalés sur un horizon de très long terme, allant de 1 à 2 siècles. À l'inverse les approches coûts-efficacité concernent généralement des horizons sensiblement plus courts, couvrant une à trois décennies (typiquement 2030 ou 2050). Dans ces approches, on l'a vu, le taux d'actualisation détermine la pente de la trajectoire de valeur carbone, non directement son niveau initial.

Au-delà de ce paramètre d'actualisation, la littérature économique récente suggère que les approches coûts-avantages tendent à minorer le coût des dommages et de ce fait à postuler des « budgets carbone » plus larges que ceux issus des nouvelles ambitions climatiques. Trois sources de sous-estimation des dommages coexistent :

- les modèles ne prennent généralement pas en compte l'intégralité des dommages potentiels – dont certains sont difficilement monétisables car ils n'impactent pas directement le PIB et la valeur des actifs – ou n'intègrent pas les dernières évaluations – plus pessimistes (Aufhamer, 2018) ;

- on considère traditionnellement que le changement climatique affecte le niveau du PIB *via* la productivité, le déclassement du capital et les destructions provoquées par les catastrophes. Mais il se peut aussi, comme l'évoque une littérature

naissante, que le taux de croissance soit affecté par une diminution du stock de capital ou des gains de productivité, en particulier dans les pays pauvres et vulnérables au changement climatique (Moore & Diaz, 2015 ; Dietz & Stern, 2015) ;

- les modèles reposent sur des courbes de dommages faiblement convexes, sous-estimant les risques de catastrophe en cas d'élévation marquée des températures.

À cet égard, une critique plus fondamentale porte sur le champ de pertinence de l'analyse coûts-avantages : celle-ci est supposée conduite par un planificateur mondial bienveillant comparant à la marge les coûts de l'inaction et les coûts de l'action, généralement sur la base de distributions de probabilité normales. Mais le changement climatique comporte des risques de dommages catastrophiques non marginaux, avec des probabilités d'occurrence mal connues mais sensiblement supérieures à celles dérivées d'une loi normale (Weitzmann, 2014 ; Van der Ploeg & de Zeuw, 2014). Dans son *Dismal Theorem* Weitzman (2011, 2014) illustre une situation dans laquelle le coût social du carbone tend vers l'infini lorsque la probabilité de catastrophe décline moins vite que n'augmente la taille du dommage catastrophique. Weitzman qualifie lui-même d'« absurdes » : les générations présentes ne peuvent vouloir consacrer la totalité de leurs ressources à la prévention de risque de catastrophe – et les conditions de validité du *Dismal Theorem* sont sans doute très restrictives. Mais le message de grande prudence dans la mise en œuvre et l'interprétation des évaluations coûts-avantages garde sa pertinence : la valeur des émissions abattues ne doit pas seulement être évaluée à l'aune des dommages évités mais aussi à celle de la réduction de la probabilité d'occurrence de catastrophes irréversibles.

Dans ce contexte, la communauté scientifique du GIEC s'est toujours montrée réservée sur les approches coûts-avantages pour déterminer le niveau optimal de dommages, préférant s'en tenir à la définition de seuils de températures à ne pas dépasser pour prévenir le risque de dommages graves et irréversibles.

Au total, le principal argument pour fonder des politiques d'atténuation plus ambitieuses que celles issues des modèles coûts-avantages repose sur le diagnostic de la double irréversibilité des concentrations de GES et des dommages.

L'irréversibilité des concentrations de GES est liée à l'état actuel des technologies. Il se peut que demain des technologies à émissions négatives rendent réversibles les concentrations accumulées – mais cette perspective reste à ce stade beaucoup trop spéculative et la sagesse recommande de tabler sur un budget carbone fini et en voie d'épuisement.

À supposer même que les émissions deviennent partiellement réversibles dans le futur, les dommages causés auront pour une partie d'entre eux une certaine irréversibilité – ce qui veut dire que les services offerts par la nature qui auront disparu ne pourront être remplacés par des services offerts par la technologie. Renforcer l'action en début de période présente donc une valeur d'option au regard du risque de se trouver sans marge de manœuvre : si un aléa favorable se matérialise, il sera toujours possible de baisser le niveau d'abattement ultérieur, par rapport à ce qui était envisagé ; en revanche, dès lors que l'on butera sur la contrainte du budget carbone, l'aléa défavorable se transmettra intégralement en dommages (Bureau, 2017).

Mettre en évidence les limites actuelles des approches coûts-avantages ne veut pas dire que les coûts économiques et sociaux de l'atténuation doivent être occultés. Une approche coûts-efficacité permet précisément, à travers une trajectoire de valeurs carbone, de prendre la mesure économique des actions d'abattement à engager, de leur ordre de mérite, des investissements de décarbonation nécessaires et des risques de coûts échoués pour atteindre un objectif climatique donné.

La traduction de la valeur carbone dans les politiques publiques

La valeur du carbone définit une référence pour calibrer les politiques d'atténuation : toutes les actions présentant un coût d'abattement inférieur à cette référence doivent être entreprises car elles sont socio-économiquement rentables.

L'instrument de premier rang des politiques d'atténuation est le signal-prix uniforme appliqué à toutes les émissions mondiales (Tirole, 2009) : plus l'assiette est large plus on élargit les opportunités d'abattement à faible coût. Cette règle d'efficacité pose ensuite d'épineux enjeux d'équité. La mise en œuvre d'une tarification mondiale du carbone ne se heurte pas seulement au problème du « passager clandestin » mais aussi à un problème de compensation financière :

les pays avancés portent une large part de la responsabilité historique du réchauffement mais les principaux gisements d'abattement à faibles coûts, notamment l'élimination du charbon, se situent dans les pays émergents. Si des compensations financières entre pays ne sont pas mises en place, l'unicité du prix du carbone ne permet plus de garantir l'équité (d'Autume *et al.*, 2016). À ce stade, l'Accord de Paris de 2015 se fonde sur un cumul d'engagements quantitatifs nationaux, solution plus pragmatique pour enclencher une dynamique internationale de convergence des actions d'atténuation, mais sans la coordination décentralisée des efforts que permettrait un mécanisme de tarification mondiale du carbone.

Une tarification minimale du carbone est nécessaire. La question opérationnelle est celle de son bon niveau au regard de deux enjeux. Un enjeu social d'abord : la tarification du carbone peut-elle être alignée sur une valeur carbone de référence élevée ? Un enjeu économique ensuite : la tarification du carbone peut-elle suffire à enclencher une décarbonation profonde des activités humaines ?

Ces questions relatives au bon niveau de tarification et à la complémentarité des instruments de la décarbonation sont aujourd'hui à l'agenda des recherches économiques sur le climat. Les termes du débat sont aujourd'hui clairement posés : une tarification du carbone calée sur les valeurs carbone des modèles relèverait d'un monde où toutes les politiques publiques seraient par ailleurs bien alignées sur l'objectif de neutralité carbone et les imperfections de marché inexistantes ou corrigées. Cela supposerait notamment que :

- les politiques foncières et d'urbanisme et les politiques de mobilité soient bien coordonnées (que les personnes ne soient pas contraintes à des trajets domicile-travail longue distance à cause de prix de l'immobilier trop élevés, que les villes soient compactes et disposent de réseaux de mobilité durable, etc.) ;

- les acteurs disposent d'alternatives décarbonées (réseaux d'infrastructure appropriés, solutions technologiques) et des moyens de financer des investissements de décarbonation rentables (accès au crédit facilité, garanties permettant de couvrir certains risques, etc.) ;

- l'État soit capable de séparer totalement la question de la mise en place d'une tarification efficace du carbone de celle du traitement de ses effets distributifs ou de ses impacts sur la compétitivité.

Une logique plus fine consiste à considérer que la transition vers la neutralité carbone doit reposer sur un alignement de l'ensemble des politiques

publiques sur l'objectif « zéro émissions nettes » et une agrégation « intelligente » de mesures complémentaires. C'est le sens des travaux de l'OCDE (2015) et du rapport Stern-Stiglitz (2017) : pour se mettre sur la bonne trajectoire de décarbonation, le monde a besoin d'une tarification minimale effective du carbone pour établir la vérité des prix, donner de la rentabilité aux projets de décarbonation et stimuler la recherche de solutions innovantes. Mais il faut agir sur un front plus large pour parvenir à une décarbonation profonde des activités humaines et notamment :

- fixer un cadre réglementaire qui permette d'optimiser l'usage des sols (de densifier les villes et de minimiser les trajets pendulaires notamment) ;
- subventionner la R&D « verte » en complément de la tarification de la pollution pour surmonter à la fois les défaillances de marché et la tendance des entreprises à innover dans leur domaine d'excellence traditionnel (Acemoglu *et al.*, 2017) ;
- investir dans les réseaux et les bâtiments bas carbone ; partager si nécessaire les risques de développement des technologies décarbonées grâce à des mécanismes de garanties, et faciliter l'accès au crédit.

Selon Stern & Stiglitz (2017) la tarification minimale du carbone devrait être comprise entre 50 et 100 \$ la tonne de CO_{2e} à l'horizon 2030. Force est de constater, à la lumière des statistiques de la Banque Mondiale et de l'OCDE, que nous sommes encore loin de cette tarification minimale. D'après le recensement tenu par la Banque mondiale (2019), 46 pays et 25 collectivités territoriales ont mis en place une tarification du carbone. Cette tarification couvre 20 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre, laissant 80 % des émissions échapper à tout système de tarification. L'OCDE (2018) pour sa part mesure le *Carbon Pricing Gap*, c'est-à-dire le déficit de tarification du carbone des pays de l'OCDE et du G20 par rapport à une référence de 30 € la tonne de CO₂ : ce déficit s'élève à 76.5 % en 2018.

Sans prétendre rentrer plus avant dans les débats sur le bon choix des instruments de la politique climatique, il convient de souligner les informations clés dont les pouvoirs publics ont besoin, au-delà d'une valeur de référence du carbone, pour construire une politique climatique.

Le recours à une tarification du carbone élevée nécessite une connaissance des gagnants et perdants potentiels pour pouvoir dessiner les mécanismes de compensation les plus adéquats. Il ne nécessite pas en revanche de connaissance

fine des coûts d'abattement dans les différents secteurs de l'économie. On postule en effet que ce sont les agents économiques eux-mêmes qui, sur la base d'une connaissance intime de leurs coûts d'abattement, assument de payer une taxe libératoire ou de réduire leurs émissions.

Dans le cas où l'État choisit de recourir à des instruments non tarifaires – typiquement la réglementation ou la subvention – la connaissance précise des coûts d'abattement devient une condition indispensable de leur efficacité : une subvention ou une réglementation trop faibles sont inefficaces ; une subvention trop forte crée des rentes ; une réglementation trop stricte peut imposer des coûts de mise en conformité supérieurs à la valeur carbone de référence. Le bon calibrage de la politique climatique repose ainsi sur la capacité de l'État à connaître et suivre dans le temps la réalité des coûts d'abattement. Cette exigence est d'autant plus forte que les études disponibles indiquent une très forte dispersion du coût des actions de décarbonation entre les différents secteurs économiques et au sein de chaque secteur, ce qui se comprend aisément : une même centrale solaire ou une même éolienne génère des coûts d'abattement très différents selon sa localisation et selon la structure du système énergétique préexistant.

On peut cependant de manière générique classer les actions sectorielles de décarbonation en fonction de leur coût d'abattement (Gillingham & Stock, 2018) :

- les actions à coûts d'abattement nuls ou négatifs, notamment parce qu'elles n'engagent pas d'investissement significatif et génèrent des économies immédiates. Ces cas – rares – de « *free lunch* » relèvent principalement du registre de la sobriété : l'achat d'un véhicule plus adapté aux besoins en lieu et place d'un véhicule plus puissant et plus grand à l'occasion d'un renouvellement, l'introduction d'une dose d'éthanol dans l'essence, l'optimisation manuelle du chauffage d'un bâtiment au cours de la journée, le recours au covoiturage ;
- les actions à coût d'abattement positif mais inférieur à la valeur carbone de référence. Il s'agit d'actions financièrement non rentables mais pertinentes du point de vue de la collectivité, qu'il convient de stimuler en améliorant leur compétitivité ;
- les actions dont le coût d'abattement reste élevé, en l'état actuel des connaissances, comme le recours à l'hydrogène décarboné dans les transports, l'industrie ou la production d'énergie, ou la capture et la séquestration du carbone.

Dans ce dernier cas de figure l'évaluation des coûts d'abattement doit présenter un caractère dynamique : il se peut qu'une action présente un coût d'abattement initial élevé mais un potentiel tel que ce coût se réduise dans le temps *via* les économies d'apprentissage et d'échelle (Vogt-Schilb *et al.*, 2014). C'est en particulier ce que l'on a observé dans le domaine des panneaux solaires photovoltaïques et ce qui pourrait s'enclencher dans le domaine du véhicule électrique. Certaines actions se trouvent dans des situations intermédiaires et font de ce fait l'objet de débats : le passage du charbon au gaz génère des économies de GES importantes à court terme mais conduit à installer des équipements émetteurs de CO_{2e} à long terme ; le nucléaire réduit durablement les émissions de GES, mais son coût d'abattement tend à augmenter dans le temps.

* *
*

Dans un contexte de grandes incertitudes sur le timing, l'ampleur et l'évaluation des dommages, l'analyse de la littérature économique suggère qu'il est sans doute prématuré de se fonder sur une évaluation coûts-avantages pour calibrer un effort

de précaution. L'enjeu immédiat est « d'acheter de la flexibilité ». Poser un objectif rigoureux aujourd'hui permet de se couvrir contre un risque de dommages graves et irréversibles, avec la possibilité d'ajuster ultérieurement la trajectoire d'atténuation en cas de « bonne nouvelle » sur le climat ou les technologies *backstop*.

Par l'Accord de Paris sur le Climat de 2015, les parties se sont fixé comme ambition de parvenir à la neutralité carbone – c'est-à-dire l'équilibre entre les émissions de GES et la capacité d'absorption des puits de carbone – au cours de la seconde moitié du 21^e siècle. Pour contribuer à cet effort collectif la France, comme d'autres pays européens, s'est fixé ce même objectif à l'horizon 2050. Cette ambition doit s'incarner dans des changements de comportement, des investissements, et plus généralement dans un ensemble d'actions publiques et privées. Dans cette perspective, donner une valeur monétaire au carbone, c'est donner une valeur à l'action pour le climat, souligner que les actions de décarbonation ont une valeur pour la collectivité. Une fois une trajectoire de valeurs carbone établie, tous les acteurs publics et privés disposent d'une référence de moyen-long terme pour sélectionner les actions utiles et les mettre en œuvre par ordre de mérite. □

BIBLIOGRAPHIE

Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L. & Hemous, D. (2012). The Environment and Directed Technical Change. *American Economic Review*, 102(1), 132–166. <https://doi.org/10.1257/aer.102.1.131>

Agence Internationale de l'Énergie (2017). *Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations*. Paris: Publications de l'AIE. <https://www.iea.org/etp2017/>

Anthoff, D. & Tol, R. (2014). The Income Elasticity of the Impact of Climate Change. In: Tiezzi, S. & Martini, C. (Eds.) *Is the Environment a Luxury? An Inquiry into the relationship between Environment and Income*. New York: Routledge.

D'Autume, A., Schubert, K. & Withagen, C. (2016). Should the Carbon Price Be the Same in all Countries. *Journal of Public Economic Theory*, 18(5), 709–725. <https://doi.org/10.1111/jpet.12162>

Arrow, K. & Fischer, A. C. (1974). Environmental Preservation, Uncertainty and Irreversibility. *Quarterly Journal of Economics*, 88, 312–319. <https://doi.org/10.2307/1883074>

Aufhammer, M. (2018). Quantifying Economic Damages from Climate Change. *Journal of Economic Perspectives*, 32(4), 33–52. <https://doi.org/10.1257/jep.32.4.33>

Boiteux, M. (2001). Transports : choix des investissements et coût des nuisances. Commissariat Général du Plan, *Rapport*. La Documentation Française. <https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/014000434.pdf>

Bureau, D. (2017). La coopération climatique après l'accord de Paris - Valeur des émissions négatives et coût de la non action quand la concentration de CO₂ dépasse 400ppm. FAERE *Policy Paper* 2017-07. http://faere.fr/pub/PolicyPapers/Bureau_FAERE_PP2017_07.pdf

- Chakravorty, U., Moreaux, M. & Tidball, M. (2008).** Ordering the Extraction of Polluting Nonrenewable Resources. *American Economic Review*, 98(3), 1128–1144.
<https://www.jstor.org/stable/29730109>
- Dasgupta, P. (2008).** Discounting climate change. *Journal of risk and uncertainty*, 37(2-3), 141–169.
<https://www.jstor.org/stable/41761456>
- Dietz, S. & Stern N. (2015).** Endogenous Growth, Convexity of Damage and Climate Risk: How Nordhaus' Framework Supports Deep Cuts in Carbon Emissions. *The Economic Journal*, 125(583), 574–620.
<https://doi.org/10.1111/eoj.12188>
- Dupuit, J. (1844).** De la mesure de l'utilité des travaux publics. *Annales des Pont et Chaussée*, tome VIII.
- GIEC (2014).** Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIAR5-PartA_FINAL.pdf
- GIEC (2018).** Special Report on Global Warming of 1.5 °C.
<https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Gillingham, K. & Stock, J. H (2018).** The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions. *Journal of Economic Perspectives*, 32(4), 53–72.
<https://doi.org/10.1257/jep.32.4.53>
- Gollier, C. & Weitzman, M. (2010).** How Should the Distant Future Be Discounted When Discount Rates Are Uncertain? *Economics Letters*, 107(3), 350–53
<http://dx.doi.org/10.1016/j.econlet.2010.03.001>
- Gollier, C. (2012).** *Pricing the Planet's Future: The Economics of Discounting in an Uncertain World*. Princeton: Princeton University Press.
- Gollier, C. (2019).** On the Efficient Growth Rate of Carbon Price Under a Carbon Budget. In: *La Valeur de l'action pour le climat – Compléments. Rapport de la commission présidée par Alain Quinet*, pp. 47–73. France Stratégie.
https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2019-rapport-quinet-complements_18fevrier.pdf
- Heal, G. (2017).** The Economics of the Climate. *Journal of Economic Literature*, 55(3), 1–18.
<https://doi.org/10.1257/jel.20151335>
- Henry, C. (1974).** Investment Decisions under Uncertainty: “The Irreversibility Effect”. *American Economic Review*, 64(6), 1006–1012.
<https://econpapers.repec.org/RePEc:aea:aecrev:v:64:y:1974:i:6:p:1006-12>
- Hope, C. (2006).** The Marginal Impact of CO₂ from PAGE2002: An Intergrated Assessment Model Incorporating the IPCC's Five Reasons for Concern. *The Integrated Assessment Journal*, 6(1), 19–56
- Hotelling, H. (1931).** The Economics of exhaustible Resources. *Journal of Political Economy*, 39, 137–175.
- Le Hir, B., Pommeret, A. & Salin, M. (2019).** Abatement capital accumulation and the shadow price of carbon. In : *La Valeur de l'Action pour le climat – Compléments. Rapport de la commission présidée par Alain Quinet*, pp. 7–42. France Stratégie.
https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2019-rapport-quinet-complements_18fevrier.pdf
- Moore, F. C. & Diaz, D. B. (2015).** Temperature Impacts on Economic Growth Warrant Stringent Mitigation policy. *Nature Climate Change*, 5, 127–131.
<https://doi.org/10.1038/nclimate2481>
- Nordhaus, W. D. & Tobin, J. (1972).** Is growth obsolete? *Economic Research: Retrospect and Prospect*, 5, 1–80.
<https://econpapers.repec.org/RePEc:nbr:nberch:7620>
- Nordhaus, W. D. (2007).** A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change. *Journal of Economic Literature*, 45(3), 686–702.
<https://econpapers.repec.org/RePEc:aea:jeclit:v:45:y:2007:i:3:p:686-702>
- Nordhaus, W. D. (2018).** Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies. *American Economic Journal: Economic Policy*, 10(3), 333–360.
<https://doi.org/10.1257/pol.20170046>
- OECD (2015).** Aligner les politiques publiques au service de la transition vers une économie bas carbone. *Réunion du Conseil au niveau des Ministres, Paris 3-4 juin 2015*.
<https://www.oecd.org/fr/rcm/documents/Aligner-les-politiques-pour-une-economie-bas-carbone-CMIN2015-11.pdf>
- OECD (2018).** *Effective Carbon Rates*.
<https://www.oecd.org/tax/tax-policy/effective-carbon-rates-2018-brochure.pdf>

- Pigou, A. C. (1920).** *The Economics of Welfare*. London: Macmillan and Co.
- Pindyck, R. (2006).** Uncertainty in Environment Economics. NBER *Working Paper* N° 12752. <https://doi.org/10.3386/w12752>
- Pindyck, R. (2013).** Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us? *Journal of Economic Literature*, 51(3), 860–72. <https://doi.org/10.1257/jel.51.3.860>
- Pindyck, R. (2017).** The Use and Misuse of Models for Climate Policy. *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(1), 100–114. <https://doi.org/10.1093/reep/rew012>
- Quinet, A. (2008).** La Valeur tutélaire du carbone. Rapport de la commission présidée par Alain QUINET. Centre d'analyse stratégique, *Rapports et documents* N° 16. Paris: La Documentation française. <https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/094000195.pdf>
- Quinet, A. (2019).** La valeur de l'action pour le climat. Rapport de la commission présidée par Alain QUINET. France Stratégie, *Rapport*. https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2019-rapport-la-valeur-de-laction-pour-le-climat_0.pdf
- Ramsey, F. P. (1928).** A Mathematical Theory of Saving. *Economic Journal*, 38(152), 543–59. <https://doi.org/10.2307/2224098>
- Schubert, K. (2008).** La valeur du carbone : niveau initial et profil temporel optimaux. In: La Valeur tutélaire du carbone. Rapport de la commission présidée par Alain QUINET, tome 2, chapitre 6, pp. 282–287. Paris: La Documentation française.
- Sinn, H. W. (2015).** The Green Paradox: A Supply-Side View of the Climate Problem. *Review of Environmental Economics and Policy*, 9(2), 239–245. <https://doi.org/10.1093/reep/rev011>
- Stern, N. (2006).** *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. London: H.M. Treasury.
- Stern, N. (2013).** The Structure of Economic Modeling of the Potential Impacts of Climate Change: Grafting Gross Underestimation of Risk onto Already Narrow Science Models. *Journal of Economic Literature*, 51(3), 838–859. <https://doi.org/10.1257/jel.51.3.838>
- Stern, N. (2016).** Economics: Current climate models are grossly misleading. *Nature*, 530(7591), 407–409. <https://doi.org/10.1038/530407a>
- Stern, N. & Stiglitz, J. (2017).** *Report of the High-Level Commission on Carbon Prices*. https://static1.squarespace.com/static/54ff9c5ce4b0a53decccfb4c/t/59b7f2409f8dce5316811916/1505227332748/CarbonPricing_FullReport.pdf
- Sterner, T. & Persson, U. M. (2008).** An Even Sterner Review: Introducing Relative Prices into the Discounting Debate. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2(1), 61–76. <https://doi.org/10.1093/reep/rem024>
- Tirole, J. (2009).** Politique climatique : une nouvelle architecture internationale. Conseil d'analyse économique, *Rapport* N° 87. <http://www.cae-eco.fr/IMG/pdf/087.pdf>
- US Interagency Working Group on Social Cost of Carbon (2016).** Technical Support Document - Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis - Under Executive Order 12866. https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/sc_co2_tsd_august_2016.pdf
- Van der Ploeg, F. & de Zeeuw, A. (2014).** Climate Tipping Points and Economic Growth: Precautionary Saving and the Social Cost of Carbon. CEPR *Discussion Papers* N° 9982. <https://econpapers.repec.org/RePEc:cpr:ceprdp:9982>
- Vogt-Schilb, A., Hallgatte, S. & de Gouvello, C. (2014).** Long-term mitigation strategies and marginal abatement cost curves: A case study on Brazil. World Bank *Policy Research Working Paper* N° 6808. <https://ssrn.com/abstract=2411216>
- Weitzman, M. L. (2007).** A Review of the *Stern Review on the Economics of Climate Change*. *Journal of Economic Literature*, 45(3), 703–724. https://scholar.harvard.edu/files/weitzman/files/review_of_stern_review_jel.45.3.pdf
- Weitzman, M. L. (2011).** Fat-Tailed Uncertainty in the Economics of Catastrophic Climate Change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 5(2), 275–292. <https://doi.org/10.1093/reep/rer006>
- Weitzman, M. L. (2014).** Fat Tails and the Social Cost of Carbon. *American Economic Review*, 104(5), 544–546. <https://doi.org/10.1257/aer.104.5.544>
- World Bank (2019).** *State and Trends of Carbon Pricing 2019*. Washington, D.C.: World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/191801559846379845/pdf/State-and-Trends-of-Carbon-Pricing-2019.pdf>